

機関番号：12701

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009 ~ 2010

課題番号：21760067

研究課題名 (和文) き裂治癒によるセラミックスの耐熱衝撃性の改善

研究課題名 (英文) IMPROVEMENT OF THERMAL SHOCK RESISTANCE OF CERAMIC COMPONENTS BY CRACK-HEALING

研究代表者

中尾 航 (NAKAO WATARU)

横浜国立大学・学際プロジェクト研究センター・特任教員 (助教)

研究者番号：60361870

研究成果の概要 (和文)：

セラミックスの耐熱衝撃性に及ぼすき裂治癒の有用性を調査した。開発したガス急冷法を用いることで、優れたき裂治癒能力を有するアルミナ 18vol%SiC 複合材に所定の冷却速度により発生する熱衝撃を与えた。この手法は、高温での熱応力破壊の発生することが可能であり、高温での耐熱衝撃性を評価することができた。本手法を用いることで、き裂治癒処理により耐熱衝撃性を向上できることが明らかとなった。

研究成果の概要 (英文)：

Availability of crack-healing on the thermal shock resistance of ceramic components was investigated. Using gas quenching method, the crack-healed alumina- 18 vol% SiC composite, which has excellent self-healing ability, was applied to thermal shock of the arbitrary quenching rate. The procedure could give rise to the thermal stress fracture at high temperature. It is clearly found that the thermal shock resistance was improved by using crack-healing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：材料工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：自己治癒材料，構造・機能材料，機械材料・材料加工，エネルギー効率化，長寿命化，耐熱材料，熱疲労，構造健全性

1. 研究開始当初の背景

セラミックスは、優れた耐熱性、化学的安定性から高温用構造材料として応用が期待されている。その反面、熱伝導率が小さいため部材内部に温度差が生じやすく、熱応力が発生しやすい。これにより発生する損傷は、セラミックスの低破壊靱性と相乗し、致命的な強度低下を引き起こす要因となる。したがって、高温材料として使用されるセラミックスにとって、熱応力破壊は重要な破壊様式である。

熱応力破壊は単純な応力下での破壊と比

較して非常に複雑である。特に、この抵抗を表す熱衝撃破壊抵抗と熱損傷破壊抵抗の2つの耐熱衝撃性は、熱膨張率、弾性率、破壊強度、破壊靱性など様々な物性値が関係した複雑な因子である。このため、これらの破壊抵抗に關与する全ての因子を同時に向上することは困難であり、材質改善ではセラミックスの低耐熱衝撃性を解決するには至らない。

さらに、部材の寸法、形状の改善による耐熱衝撃性の改善も困難である。従来、セラミックス部材は高い安全率を見込み、過剰に圧肉化された設計がなされている。しかし、高

温から冷却した場合には、このように圧肉化された部材内部では、セラミックスの低熱伝導率に伴った大きな温度差が発生し、部材表面において熱応力破壊を促進する結果となってしまう、耐熱衝撃性の改善は高温セラミックス部材の設計において矛盾を生じさせている。

しかしながら、熱応力破壊も既存のき裂の成長により説明可能である。このため、表面を完全に無欠陥化できれば耐熱衝撃性を改善できると予想できる。一方、当研究グループでは、炭化ケイ素の高温酸化を利用して表面き裂を治癒可能なセラミックスの開発を行ってきた。この機能を用いることで、人間が探知できないような微小なき裂であっても治癒可能であり表面を無欠陥化によってセラミックスの耐熱衝撃性を改善することが実証できれば、耐用年数(回数)の少ない消耗品であるというセラミックス部材のレベタルを解消することができる。

上記方法論を確立するためには、以下の2点を実証する必要がある。ひとつは熱衝撃により発生した損傷を完全に治癒できること。もうひとつは、き裂治癒された部位が健全部に比べて耐熱衝撃性に優れることである。前項に関しては、先行研究において実験的に明らかとしている。図1に示すように、大きな強度低下を引き起こす損傷であっても、き裂治癒処理することで完全に強度が回復していることが分かる。しかしながら、後項については未だ検討もされておらず、特に高温におけるき裂治癒部の耐熱衝撃性に関しては、評価方法も確立していないのが現状である。

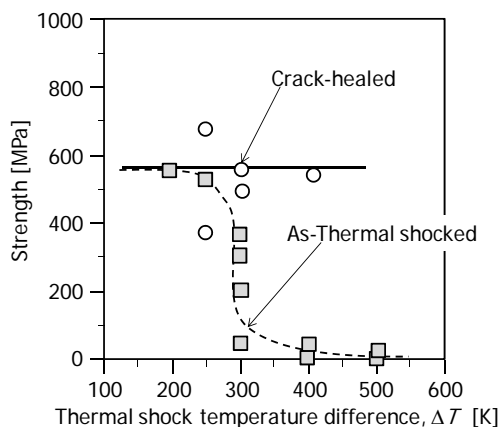


図1 治癒されたき裂を有するムライト15vol%SiC 複合材の強度(治癒されたき裂は所定の温度差により発生する熱衝撃によって導入された。)

2. 研究の目的

本研究では、自己き裂治癒による表面無欠陥化によりセラミックスの耐熱衝撃性の改善を実証するため、き裂治癒部の耐熱衝撃性

を定量的に評価することを目的とする。さらに、本研究に適した高温で熱衝撃破壊が生じる実験方法も開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 試験装置

図2に、本研究で開発した熱衝撃試験装置の模式図を示す。本装置の開発には、FEMを用いた熱流解析および熱応力解析から得られた知見を反映している。試料は、優れたき裂治癒能力を有するアルミナ-18vol%炭化ケイ素複合材の40mm角(高さ4mm)試験体とした。この試験体中央部を直径20mm高さ32mmのWC円柱で上下から挟んだ。WCは大きな熱容量を有するため、冷却時に試験体中央の急激な温度低下を抑制できる。WCと接触していない試験体上下面およびWC円柱はそれぞれ、直径22mmの穴を有する40mm角厚さ2mmのSiC板および外径30mm内径22mm高さ30mmのSiCチューブにより覆った。本試験では、赤外線集光加熱を用いたため、これらSiC治具が熱源となり、試験体および周辺治具を加熱する。このため、赤外線ランプの出力を下げると、試験体および外気との熱平衡が崩れ、試験体の周囲の気体が冷媒となり、試験体は外周部より冷却される。

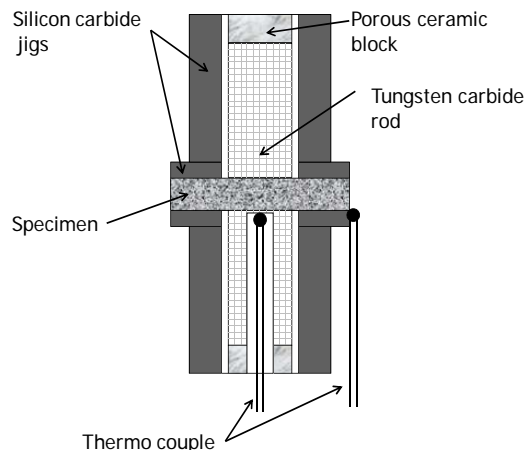


図2 試験片および周辺治具の模式図

R型熱電対を試験体中央および外周部に設置し、それぞれの温度を測定した。

(2) 試験手順

試験体および周辺治具は赤外線集光加熱により1300℃まで加熱した。その後、乾燥空气中で1時間保持することで、試験体外周面中央(最大の熱応力が作用する。)に導入したインデンテーションき裂を完全に治癒した。赤外線ランプの出力を所定の値まで下げることで、試験体を外周部より急速冷却した。その時の温度は設置した熱電対により測定した。

比較のために、同様の試験をArガス雰囲気

気においても行った。この条件ではインデンテーションき裂は治癒されない。

熱衝撃破壊が生じた試験体は、その破壊起点および破壊経路について詳細な調査を行った。また、熱衝撃破壊が生じなかった試験体から、4mm×3mm×34mmの棒状試験片を切り出した。なお、棒状試験片の1面は冷却面となるようにした。この冷却面が引張り面となるように曲げ試験を行い、残存強度の測定を行った。

4. 研究成果

図3に、得られた冷却曲線の一例を示す。これは、乾燥空気中で保持することでき裂治癒を施した試験体に対して、赤外線ランプ出力を0%とすることで急速冷却を施した際の外周部および中央部の冷却曲線である。また、併せてArガス雰囲気にて同様の冷却条件で急速冷却を施した試験体外周部の冷却曲線も示す。前述したとおり、この試験体に導入された予き裂は治癒されないまま存在している。本試験方法により試験体外周部は、冷却開始30秒で約250℃冷却されることが分かる。一方、試験体中央はその間に約20℃しか温度が低下しない。この大きな温度差によって、外周部に極めて大きな引張りの熱応力が作用する。

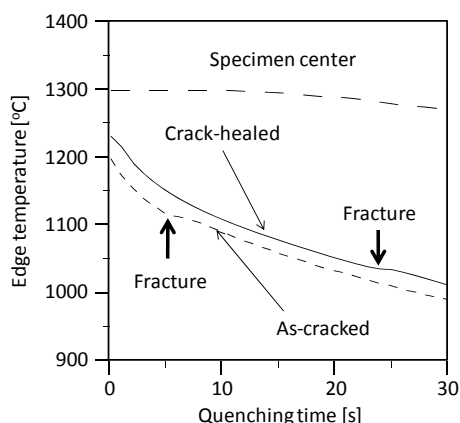


図3 急速冷却試験時の試験体外周部および中央部の冷却曲線の一例

外周部の冷却曲線には、不連続となる点が出現した。これは、熱衝撃破壊が生じ測定位置がずれることに起因している。このことから、き裂治癒を施した試験体では、冷却後24秒、外周部温度約1140℃にて熱衝撃破壊が生じた。この結果から、本研究により開発した試験装置および方法は、高温での耐熱衝撃性を測定可能なことが実証された。一方、き裂治癒が生じていない試験体は、冷却後5秒、外周部温度約1105℃にて熱衝撃破壊が発生した。それぞれの熱衝撃破壊が発生した状況を用いたFEM解析により、熱衝撃破壊時の試験体外周面に作用していた熱応力は、それぞ

れ452.3 MPaおよび349.3 MPaと算出された。このことから、き裂治癒処理が施されることで、耐熱衝撃性が向上することが分かった。

さらに、本試験方法ではき裂治癒部に最大の熱応力が作用するようにしているにもかかわらず、き裂治癒された試験体の破壊起点は、き裂治癒部ではなくその他の内部欠陥であった。よって、き裂治癒部は健全部よりも高い耐熱衝撃性を有することが分かった。

赤外線ランプ出力を変化させ、同様の試験を繰り返し、熱衝撃挙動を図4のようにまとめた。ここで、横軸は冷却後30秒での平均冷却速度とし、縦軸は熱衝撃後の残存強度とした。なお、熱衝撃破壊が生じた試験体の残存強度は0 MPaとした。熱衝撃破壊が生じる最低の冷却速度を臨界冷却速度と定義すると、き裂治癒材および予き裂材の臨界冷却速度はそれぞれ6.47 K/sおよび5.02 K/sとなった。このことから、き裂治癒処理を施すことで、耐熱衝撃性が向上することが分かった。さらに、き裂治癒材の破壊起点はき裂治癒部で無いことから、き裂治癒部の臨界冷却速度はさらに大きいことが予想される。

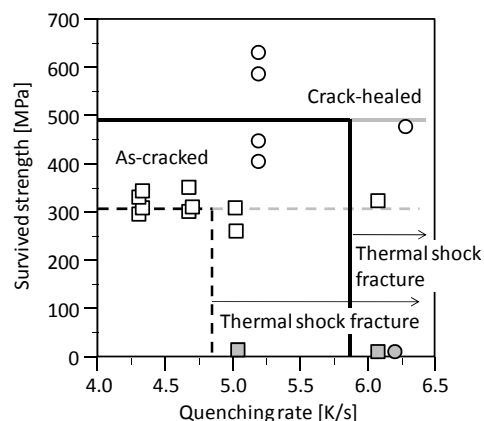


図4 き裂治癒材と予き裂材の熱衝撃挙動の比較

今後は、熱衝撃損傷が繰返されることで生じる熱疲労特性に及ぼすき裂治癒の効果を定量的に調査していくことが重要である。これら耐熱衝撃性に関する基礎データを集積することは、高温用セラミックス部材の信頼性向上に大きく寄与すると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

(1) W. Nakao, Improvement on Thermal Shock Resistance of Ceramic Component By Using Self-Healing, ASME 2010 Conference on Smart Materials, Adaptive Structure and Intelligent Systems, 平成22年9月29日, Double Tree Hotel Philadelphia.

(2) W. Nakao, Potential Use of Crack-healing To Improve Thermal Shock Resistance Conference on Advanced Ceramics and Composites, 平成 23 年 1 月 27 日, Hilton Daytona Beach Resort.

(3) 清水泰輔, 中尾航, セラミックスの耐熱衝撃性に及ぼす亀裂治癒の効果, 2009 年度日本機械学会年次大会, 平成 21 年 9 月 16 日, 岩手大学

(4) 中尾航, エネルギー機器における自己治癒材料の有用性, 2009 年度日本機械学会年次大会, 平成 21 年 9 月 14 日, 岩手大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中尾 航 (WATARU NAKAO)

横浜国立大学・学際プロジェクト研究センター・特任教員 (助教)

研究者番号 : 60361870